

АЛГОРИТМ ДИСТАНЦИОННОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

В настоящее время повысилась актуальность контроля уровня радиации и радиационного загрязнения во всех сферах деятельности и обитания человека. Однако на объектах транспорта, особенно в акваториях морских предприятий, из-за удалённости источников загрязнения такой контроль осуществлять крайне сложно и затратно. Поэтому возникает проблема дистанционного радиологического контроля уровня радиации почвы, воды и приземного воздуха. Решение такой задачи обеспечит своевременное обнаружение источников загрязнения.

Существующие сегодня системы контроля осуществляют, как правило, точечный контроль уровня радиации почвы, воды и приземного воздуха. При этом используются в основном автоматизированные системы контроля. Однако, кроме радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности возможен выброс радиоактивного аэрозоля в атмосферу, который затем ветровыми потоками разносится на большие расстояния, загрязняя при этом не только атмосферный воздух, но и облака и осадки, которые становятся радиоактивными и выпадают на подстилающую поверхность. До настоящего времени ни техническим персоналом (службой контроля), ни экологическими и санитарными службами высотный радиоактивный контроль не осуществляется. Поэтому разработка методов и аппаратуры дистанционного радиолокационного контроля атмосферного воздуха является актуальной задачей.

Дистанционное исследование атмосферы в основном выполняется метеорологическими радиолокаторами (МРЛ) [1 – 3]. Однако исторически сложилось так, что информацию об атмосферном аэрозоле до настоящего времени получают в основном только при наличии в атмосфере облаков и осадков с помощью некогерентных (МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5) и когерентных доплеровских МРЛ. В качестве основных информационных параметров используют амплитуду (мощность) и частоту электромагнитной волны, и хотя к настоящему времени в различных научных публикациях [4 – 6] изложены многие вопросы поляризационной селекции радиолокационных сигналов и изготовлены экспериментальные образцы радиолокационных поляриметров, однако, полный поляризационный анализ в задачах распознавания ра-

диоактивного аэрозоля (в том числе и радиоактивного) в безоблачной турбулентной атмосфере до настоящего времени не выполняется.

Данное исследование посвящено развитию поляризационного метода распознавания, использующегося в метеорологической радиолокации. Целью статьи является обоснование полного поляризационного анализа в решении задачи радиолокационного распознавания радиоактивного аэрозоля в безоблачной турбулентной атмосфере.

В отличие от существующих радиолокационных методов исследования состояния атмосферы, в которой находится различный аэрозоль (атмосферная пыль, облака, осадки), в задаче обнаружения и распознавания радиоактивного аэрозоля предлагается использовать информацию, которую несет поляризация электромагнитной волны при ее взаимодействии с атмосферой. Все возможные состояния поляризации можно представить с помощью четырех действительных параметров Стокса, имеющих размерность интенсивности. Обозначим их через I, Q, U, V . В декартовой системе координат они запишутся [7, 8]:

$$\begin{aligned} I &= \langle E_x^2(t) \rangle + \langle E_y^2(t) \rangle \\ Q &= \langle E_x^2(t) \rangle - \langle E_y^2(t) \rangle \\ U &= 2\langle E_x(t)E_y(t) \cos[\Phi_x(t)\Phi_y(t)] \rangle \\ V &= 2\langle E_x(t)E_y(t) \sin[\Phi_x(t)\Phi_y(t)] \rangle, \end{aligned}$$

где $E_x(t)$ и $E_y(t)$ – ортогональные компоненты электромагнитной волны; $\Phi_x(t)$ и $\Phi_y(t)$ – фазы соответствующих компонент.

Первый параметр Стокса представляет собой полную интенсивность электромагнитной волны, второй – разность интенсивностей ортогональных компонент, третий и четвертый – корреляционную связь между амплитудами и фазами соответствующих компонент.

Образует вектор-столбец параметров Стокса и назовем его вектором Стокса:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad \text{или} \quad S = \{I, Q, U, V\}.$$

Для неполяризованной волны $Q = U = V = 0$ и вектор Стокса запишется в виде: $S = \{I, 0, 0, 0\}$.

Для полностью поляризованной волны

$$I^2 = Q^2 + U^2 + V^2,$$

а для частично поляризованной волны

$$I^2 > Q^2 + U^2 + V^2.$$

Частично поляризованную волну можно разложить на полностью поляризованную и неполяризованную:

$$S = S_{\text{непол}} + S_{\text{пол}}.$$

С учетом того, что $S = \{I, Q, U, V\}$:

$$S_{\text{непол}} = \left\{ \left[I - (Q^2 + U^2 + V^2) \right]^{\frac{1}{2}}, 0, 0, 0 \right\};$$

$$S_{\text{пол}} = \left\{ (Q^2 + U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}, Q, U, V \right\}.$$

Тогда степень поляризации электромагнитной волны

$$m = \frac{(Q^2 + U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}}{I},$$

а угол эллиптичности ε и угол ориентации эллипса поляризации β связаны с параметрами Стокса соотношениями:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \arcsin \frac{V}{I};$$

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q}.$$

Полная интенсивность волны, степень поляризации и форма поляризации полностью поляризованной компоненты, выраженная через параметры Стокса, несут всю физическую информацию о состоянии атмосферного аэрозоля.

Преимущество параметров Стокса при решении задачи распознавания радиоактивного аэрозоля в атмосфере состоит в том, что радиозондирование можно осуществлять некогерентными МРЛС, антенная система которых позволяет излучать и принимать электромагнитную волну любой поляризации. При облучении радиоактивного объема атмосферы электромагнитной волной фиксированной поляризации, отраженная волна будет всегда частично поляризована, а ее структура будет характеризоваться четырехмерным вектором, свойства которого можно описать параметрами Стокса. Для вычисления плотности вероятности параметров Стокса I и V необходимо от плотности вероятности ортогональных компонент волны $W_1(E_x^2, E_y^2)$ перейти к совместной плотности вероятности их квадратов, то есть $W_2(E_x^2, E_y^2)$.

В результате такого перехода получим:

$$W(I) = \int_0^1 W_2(E_x^2, I - E_x^2) \delta E_x ;$$

$$W(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} W_2(E_x^2, V + E_x^2) \delta E_x .$$

Плотность вероятностей параметров Стокса Q и U определяется интегрированием совместной плотности вероятностей $W_2(Q, U)$ с изменением в пределах $[-\infty, +\infty]$:

$$W(Q) = \int_{-\infty}^{+\infty} W_2(Q, U) \delta U ;$$

$$W(U) = \int_{-\infty}^{+\infty} W_2(Q, U) \delta Q ,$$

где

$$W_2(Q, U) = \int_0^{\infty} W_2[E_x, E_y = f_1(Q, U, E_x), \Phi_{xy} = f_1(Q, U, E_x)] \times$$

$$\times \frac{\partial(E_x, E_y, \Phi_{xy})}{\partial(E_x, Q, U)} \delta E_x ,$$

а интегральная функция распределения

$$F(I, Q, U, V) = \int^{I, Q, U, V} W(I, Q, U, V) \delta I, \delta Q, \delta U, \delta V .$$

Нижний предел интегрирования зависит от конкретного вида параметра. Решение задачи радиолокационного распознавания радиоактивного объема безоблачной турбулентной атмосферы может быть основано на использовании критерия Неймана-Чирсона или с использованием Байесовского алгоритма. При использовании критерия Неймана-Чирсона условные вероятности правильного и неправильного распознавания [5]:

$$P_D = \int_{G_1} W_1(I, Q, U, V) \delta I, \delta Q, \delta U, \delta V ;$$

$$P_F = \int_{G_2} W_2(I, Q, U, V) \delta I, \delta Q, \delta U, \delta V ,$$

где W_1 и W_2 – плотности вероятностей параметров Стокса соответственно для сигналов первого и второго классов.

Область G принятия решения о том, что сигнал принадлежит первому классу, определяется с помощью неравенства

$$I(I, Q, U, V) = \frac{W_1(I, Q, U, V)}{W_2(I, Q, U, V)} \gg \frac{c\left(\frac{1}{2}\right)q_2}{c\left(\frac{2}{1}\right)q_1} = I_0,$$

где q_1 и q_2 – априорные вероятности появления сигналов соответственно первого и второго классов; $c\left(\frac{1}{2}\right)$ и $c\left(\frac{2}{1}\right)$ – цены за неправильное решение принять соответственно сигнал второго класса за первый и наоборот.

Ошибки неправильных решений оцениваются условными штрафами.

При использовании Байесовского алгоритма распознавания допускается равенство штрафов. Тогда правило принятия решения определяется неравенством [9]:

$$\frac{W\left(\frac{\bar{X}}{A}\right)}{W\left(\frac{\bar{X}}{B}\right)} > \frac{P(B)}{P(A)},$$

где \bar{X} – вектор; W – условная плотность совместного распределения признаков распознавания; $P(A)$ и $P(B)$ – вероятности появления того или иного значения диэлектрической проницаемости радиоактивного объема атмосферы ε' .

При неизвестных вероятностях $P(A)$ и $P(B)$ и штрафах за ошибки распознавания, используется правило максимума правдоподобия:

$$\frac{W\left(\frac{\bar{X}}{A}\right)}{W\left(\frac{\bar{X}}{B}\right)} > 1. \tag{1}$$

В соответствии с (1) принимается решение о том, что отраженный сигнал образован турбулентным объемом с ε'_t , если

$$\frac{W\left(\frac{\bar{X}}{A}\right)}{W\left(\frac{\bar{X}}{B}\right)} \geq 1,$$

где ε'_T – диэлектрическая проницаемость атмосферы при отсутствии в ней радиоактивного аэрозоля.

В случае, если

$$\frac{W\left(\frac{\bar{X}}{A}\right)}{W\left(\frac{\bar{X}}{B}\right)} < 1,$$

то принимается решение, что отраженный сигнал образован радиоактивным объемом атмосферы с ε'_p .

При использовании Байесовского алгоритма распознавания в качестве вектора признаков можно использовать любой из четырех параметров Стокса или одновременно все четыре.

Рассмотрим радиолокационное распознавание радиоактивного аэрозоля в безоблачной турбулентной атмосфере при использовании вектора признаков четвертого параметра Стокса ($V=2E_x E_y \sin\Phi_{xy}$). В соответствии с правилом максимума правдоподобия проверяем выполнение условия

$$\frac{W\left(\frac{\bar{V}}{\varepsilon'_p}\right)}{W\left(\frac{\bar{X}}{\varepsilon'_T}\right)} < 1.$$

Для решения поставленной задачи распознавания турбулентного объема атмосферы необходимо знать законы распределения. Проверка показала, что эти законы – нормальные и могут быть представлены в виде

$$\frac{W\left(\frac{V}{\varepsilon_p}\right)}{W\left(\frac{V}{\varepsilon_T}\right)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \cdot e^{-\frac{(V-m_p)^2}{2\sigma_p^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_T} \cdot e^{-\frac{(V-m_T)^2}{2\sigma_T^2}}}, \quad (2)$$

где V – измеренный с помощью МРЛ четвертый параметр Стокса; m_p

и m_T – математические ожидания четвертого параметра Стокса для радиоактивного и нерадиоактивного объема атмосферы; σ_p^2 и σ_T^2 – соответственно дисперсии четвертого параметра Стокса.

После несложных преобразований выражения (2) получим

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_p} \cdot e^{aV^2+bV+c} \geq 1,$$

где a, b, c – определяются из условий:

$$a = \frac{\sigma_p^2 - \sigma_T^2}{2\sigma_p^2\sigma_T^2}; \quad b = \frac{m_p\sigma_T^2 - m_T\sigma_p^2}{\sigma_T^2}; \quad c = \frac{m_T\sigma_p^2 - m_p\sigma_T^2}{2\sigma_p^2\sigma_T^2}. \quad (3)$$

Логарифмируя (3) по основанию e , получим

$$aV^2 + bV + c \geq \ln \frac{\sigma_p}{\sigma_T}. \quad (4)$$

Решая (4) относительно V , находим его критериальное значение $V_{кр}$. При всех значениях $V \geq V_{кр}$ неравенство (4) будет справедливым. Тогда измерив с помощью МРЛ четвертый параметр Стокса $V_{изм}$ и сравнив его значение с $V_{кр}$, принимаем следующее решение:

если $V_{изм} \geq V_{кр}$, то в атмосфере присутствует радиоактивный аэрозоль;

если $V_{изм} < V_{кр}$, то радиоактивный аэрозоль в атмосфере отсутствует.

Таким образом:

разработан алгоритм радиолокационного распознавания радиоактивного аэрозоля в турбулентной безоблачной атмосфере;

обосновано преимущество использования действительных безразмерных параметров Стокса при решении задачи радиолокационного распознавания радиоактивного аэрозоля;

показано, что поляризация электромагнитной волны является ее наиболее информативным параметром при решении задачи распознавания.

Разработанный алгоритм радиолокационного распознавания может быть использован для распознавания в атмосфере аэрозолей любого происхождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 217 с.
2. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1993. – 349 с.

3. Павлов Н.Ф. Аэрология, радиометеорология и техника безопасности. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 431 с.
4. Потехин В.А., Глухов А.Н., Родимов А.П. К вопросу селекции радиолокационных сигналов // Радиотехника и электроника. – 1969. – Вып. 3. – Том 14. – С. 430 – 440.
5. Поздняк С.И., Мелитицкий В.А. Введение в статистическую теорию поляризации. – М.: Советское радио, 1974. – 479 с.
6. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. – М.: Советское радио, 1966. – 440 с.
7. Канарейкин Д.Б., Потехин В.А., Шишкин Н.С. Морская поляриметрия. – Л.: Судостроение, 1968. – 328 с.
8. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. – М.: Мир, 1981. – 583 с.
9. Радиометеорология. – М.: Военное издательство, 1984. – 208 с.